آزمایش رسانایی الکتریکی اصلاح‌شده برای سنجش مقاومت بتن درمقابل نفوذ یون‌های کلرید*

امیررضا پیلوار[۱]   علی اکبر رمضانیانپور[۲]   حسین رجایی[۳]

چکیده *در این مقاله روشی جدید برای سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید ارائه شده است که شامل اشباع‌سازی نمونه‌ها توسط محلول NaCl ۵ مول، قبل از اندازه‌گیری رسانایی آنها می‌باشد. با اشباع کردن نمونه‌ها توسط محلول با رسانایی بالا، رسانایی‌های نمونه‌های مختلف بتنی متناسب با ساختار منافذ آنها می‌شود. برای بررسی عملکرد این روش، طرح‌های اختلاط مختلف بتن ساخته شد. مشاهده گردید که نتایج روش ارائه‌شده حساسیت کمتری نسبت به رسانایی مایع منفذی درمقایسه با روش‌های آزمایش نفوذ تسریع‌یافتهٔ یون‌های کلرید (RCPT) و رسانایی حجمی (BC) دارد. همچنین ارتباط خوبی بین نتایج این روش با نتایج آزمایش انتشار حجمی (BD) به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی بتن، نفوذپذیری کلریدی، رسانایی الکتریکی، مایع منفذی.

Modified Electrical Conductivity Test Method for Evaluation Concrete Chloride Ion Permeability

A. Pilvar   A.A. Ramezanianpour   H. Rajaei

Abstract *Standard test method for bulk electrical conductivity (ASTM C1760) provides a rapid indication of the concrete’s resistance to the penetration of chloride ions by diffusion. In this paper a new approach for assessing the bulk electrical conductivity of saturated specimens of hardened concrete is presented. The test involves saturating concrete specimens with a 5 M NaCl solution before measuring the conductivity of the samples. By saturating specimens with a highly conductive solution, they showed virtually the same pore solution conductivity. Different concrete samples yield different conductivity primarily due to differences in their pore structure. The feasibility of the method has been demonstrated by testing different concrete mixtures consisting ordinary and blended cement of silica fume (SF) and calcined perlite powder (CPP). Two standard test methods of RCPT (ASTM C1202) and Bulk Conductivity (ASTM C1760) were also applied to all of the samples. The results show that for concretes containing SF and CPP, the proposed method is less sensitive towards the variations in the pore solution conductivity in comparison with RCPT and Bulk Conductivity tests. It seems that this method is suitable for the assessment of the performance and durability of different concretes containing supplementary cementitious materials.*

Key Words Concrete, Chloride Permeability, Conductivity, Pore Solution.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹٤/٥/١٦ و تاریخ پذیرش آن ۹٥/٥/۲۳ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: استادیار موسسه آموزش عالی توس.   Email: amir63p@aut.ac.ir

(۲) استاد دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

(۳) استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مقدمه

یکی از عوامل تخریب زودرس سازه‌های بتن مسلح، خوردگی فولادهای آنها می‌باشد و این مسئله از مهم‌ترین مشکلاتی است که صنعت ساختمان دررابطه با دوام با آن مواجه است [1]. معمولا خوردگی آرماتور ناشی از کاهش قلیاییت در اثر پدیدهٔ کربناتاسیون محیط اطراف آن در بتن و یا حضور یون‌های کلرید در سطح آرماتورها می‌باشد. یون‌های کلرید محلول در آب ناشی از استفاده از نمک‌های یخزدا، یون‌های موجود درون خاک، آب دریاها و آب‌های زیرزمینی می‌توانند به بتن نفوذ کنند و به سطح آرماتور برسند. مکانیزم اصلی انتقال یون‌های کلرید در سطح بتن، مخصوصا وقتی این سطح غیر اشباع باشد، جذب مویینه می‌باشد و تجمع این یون‌ها در لایه‌های سطحی بتن باعث انتقال یون‌ها به‌صورت انتشار به لایه‌های زیرین می‌شود [2]. بنابراین، انتشار مکانیزم اصلی جابه‌جایی یون‌ها در لایه‌های زیرین بتن می‌باشد. نیروی رانش در انتشار یون‌های کلرید، اختلاف غلظت بین یون‌ها در قسمت‌های مختلف بتن می‌باشد [3].

باتوجه به اهمیت تعیین نفوذپذیری بتن درمقابل یون‌های کلرید، روش‌های مختلفی برای ارزیابی آن تاکنون ارائه شده است. روش‌های اولیهٔ اندازه‌گیری ضریب انتشار یون‌های کلرید در بتن بر پایهٔ مغروق‌سازی نمونه‌های بتنی در محلول نمک می‌باشد [4]. در این روش‌ها پس از مدتی مشخص پس از شرایط در معرض قرارگیری، بااستفاده از تعیین پروفیل نفوذ یون‌های کلرید و برازش رابطهٔ دوم فیک، ضریب انتشار یون‌های کلرید در بتن مورد نظر به‌دست می‌آید، اما یکی از ضعف‌های این روش‌ها زمان طولانی مورد نیاز آزمایش در شرایط معمول می‌باشد.

باتوجه به این‌که ضریب انتشار کلرید، یکی از پارامترهای مهم در تعیین دوام بتن می‌باشد توجه زیادی به استفاده از روش‌های تسریع‌یافته صورت گرفته است. یکی از این رویکردها افزایش غلظت یون‌های کلرید محلول مورد استفاده می‌باشد، ولی در این حالت رفتار انتشار ممکن است به‌دلیل تداخل و اثر متقابل یون‌ها، از روابط فیک پیروی نکند [5,6]. رویکرد دیگر استفاده از یک پتانسیل الکتریکی به‌عنوان نیروی خارجی برای افزایش نفوذ یون‌ها می‌باشد. این رویکرد به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [7]. با اعمال پتانسیل الکتریکی خارجی انتقال یون‌ها درجهت میدان الکتریکی انجام می‌گیرد.

در اوایل دههٔ ۱۹۸۰، Whiting [8] اولین روش تسریع‌یافتهٔ الکتریکی را برای سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید ارائه داد. در این روش که به روش RCPT معروف است، مجموع بار الکتریکی عبوری از میان نمونهٔ آزمایش در طول زمان مشخص اندازه‌گیری می‌شود. به همین دلیل، در این روش اطلاعات مشخصی در مورد مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید به‌دست نمی‌آید. هرچند روش RCPT به‌دلیل آسانی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما در مجامع علمی انتقاداتی نیز به آن وارد شده است [9]. روش RCPT را می‌توان از جهت تغییرات دمایی در طول آزمایش مورد نقد قرار داد. همچنین به‌طور تئوری، رابطه‌ای صحیح و کامل بین نتایج آن با ضریب انتشار نمی‌توان پیدا کرد. از طرفی تغییراتی که در مشخصات مایع منفذی زمانی که از مواد پوزولانی استفاده می‌شود، به‌وجود می‌آید باعث عدم اطمینان به نتایج RCPT می‌شود. به‌علاوه به‌دلیل ولتاژ نسبتا زیاد ۶۰ ولت، جریان برقرارشده در حالت پایداری قرار نمی‌گیرد [10].

در نروژ، روش مشابهی ارائه گردید که بر پایهٔ مشاهدهٔ نرخ مهاجرت یون‌های کلرید از میان بتن می‌باشد و با عنوان نفوذپذیری کلریدی معروف است [11]. در این روش، نمونهٔ بتنی درون سلول آزمایش از یک طرف در تماس با محلول حاوی یون‌های کلرید و از طرف دیگر با محلول فاقد یون‌های کلرید قرار می‌گیرد. سپس بااستفاده از اختلاف پتانسیل الکتریکی، یون‌های کلرید به‌درون نمونه رانده می‌شوند. این فرایند ادامه می‌یابد تا یون‌های کلرید از یک طرف نمونه به

طرف دیگر آن برسند. سپس با مشاهدۀ نرخ نفوذ یون‌های کلرید، نفوذپذیری نمونه سنجیده می‌شود. به‌هرحال، نتایج این روش یک پارامتر کیفی تجربی می‌باشد که به شرایط آزمایش بستگی دارد. می‌توان گفت، نرخ نفوذ یون‌های کلرید مشاهده‌شده به میزان غلظت محلول نمک و ولتاژ اعمال‌شده بستگی دارد.

در اوایل ۱۹۹۰ در سوئد، Nilsson و Tang [12] اولین کسانی بودند که روشی تسریع‌یافته ارائه دادند که در آن از رابطه‌ای تئوری بین انتشار و مهاجرت برای محاسبه ضریب انتشار یون‌های کلرید استفاده کردند. در این روش پس از اعمال پتانسیل الکتریکی و نفوذ یون‌های کلرید به بتن، ضریب انتشار براساس مشاهدۀ عمق نفوذ یون‌های کلرید، محاسبه می‌گردد. از مزیت‌های آن می‌توان به‌سادگی، زمان نسبتا کوتاه و پیش‌زمینۀ تئوری آن اشاره کرد.

از طرفی دیگر، رسانایی الکتریکی بتن یکی از خواص بتن می‌باشد که از آن می‌توان برای ارزیابی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید استفاده کرد. از تحقیقات تئوری و کارهای آزمایشگاهی انجام‌شده مشخص است که بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذ یون‌های کلرید رابطه‌ای وجود دارد [13-16]. رسانایی الکتریکی بتن بیانگر جابه‌جایی یون‌ها، از جمله یون‌های کلرید، درون مایع منفذی بتن می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود ارتباط منطقی بین رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری بتن وجود داشته باشد. در یک ساختار مشخص، قسمت‌های نفوذپذیرتر دارای رسانایی الکتریکی نسبی بیشتر می‌باشد. اما محدودیت‌هایی در ارتباط بین خاصیت رسانایی بتن با نفوذپذیری آن وجود دارد. رسانایی نمونه‌های بتنی به هر دو عامل خصوصیات ریزساختار منافذ مویین و رسانایی مایع منفذی وابسته است. درنتیجه روش‌های آزمایش رسانایی بتن از تغییرات رسانایی مایع منفذی تأثیر می‌پذیرند. این تغییرات در رسانایی بتن لزوما با انتشارپذیری آن متناسب نمی‌باشد. به‌عنوان مثال، بتنی که با سیمان با پایۀ قلیاییت پایین ساخته شده باشد، نسبت به نمونۀ بتنی که دارای قلیاییت بالاتری باشد، حتی اگر دارای ساختار منافذ مویین یکسانی باشد، رسانایی کمتری از خود نشان می‌دهد. این موضوع یکی از محدودیت‌های روش‌های رسانایی در ارزیابی خاصیت نفوذپذیری بتن می‌باشد [17].

در این مقاله، براساس اصول الکتروشیمیایی، شیوه‌ای جدید برای اندازه‌گیری رسانایی بتن ارائه شده است. نتایج این روش مستقل از رسانایی مایع منفذی بتن‌های مختلف می‌باشد. همچنین در این مقاله عملکرد این روش به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

پایه‌های تئوری

روش اصلاح‌شدۀ جدید برای اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی درجهت ارزیابی نفوذپذیری کلریدی بتن بر پایه توزیع یون‌ها به‌طور یکنواخت و در شرایط پایدار می‌باشد. ضریب انتشار و رسانایی در حالت پایدار به‌راحتی قابل اندازه‌گیری و محاسبه می‌باشد. در روش‌هایی که مکانیزمشان تنها انتشار می‌باشد، یک دورۀ یک‌ساله و یا بیشتر نیاز است تا در نمونه‌های بتنی با ضخامت مناسب به حالت پایدار برسیم.

نیروی رانش برای انتشار، تفاوت غلظت یونی می‌باشد و گرادیان بیشتر، باعث افزایش میزان انتشار می‌شود. در شرایط پایدار انتشار، گرادیان غلظت دارای شیب ثابت می‌باشد. در هنگام برقراری جریان الکتریسیته، نیروی رانش، میدان الکتریسیته می‌باشد. در شرایط پایدار رسانش، میدان الکتریسیته ثابت می‌باشد و یون‌های باردارشده دارای پراکندگی یکنواختی می‌باشند. در یک آزمایش رسانش که در یک وجه نمونۀ بتنی محلول حاوی کلرید قرار دارد، در ابتدا یون‌های کلرید در یک مسیر معین به داخل بتن نفوذ می‌کنند. شرایط پایدار هنگامی حاصل می‌شود که خط اول یون‌ها از نمونۀ بتنی عبور کند. در آن هنگام غلظت یون‌های

کلرید در مایع منفذی یکنواخت می‌شود. در روش‌های معمول، شرایط لازم برای حالت پایدار بعد از گذشت روزها به‌وسیلهٔ رانش یون‌های کلرید توسط اختلاف پتانسیل الکتریکی، در نمونه‌های بتنی اشباع‌شده با آب، حاصل می‌شود. این شرایط را می‌توان بسیار سریع‌تر به‌طور کامل از طریق ایجاد خلأ و اشباع‌سازی نمونه‌های بتنی با محلول حاوی کلرید به‌وجود آورد. با اشباع کردن نمونه‌ها توسط محلول حاوی کلرید، حالت پایدار از همان ابتدا حاصل می‌شود.

ارتباط بین رسانایی و انتشار

با این‌که انتشار و رسانایی دارای مکانیزم‌های انتقال یونی متفاوتی هستند، ولی هر دو در غلظت‌های یونی پایین به‌صورت خطی توسط رابطهٔ Einstein به هم مرتبط می‌شوند [10]:

$$\mu = zF(\frac{D}{RT})$$

که در آن μ قابلیت انتقال یونی، z ظرفیت یونی، F ثابت فارادی، D قابلیت انتشار یونی، R ثابت گازها و T دمای مطلق می‌باشد.

در غلظت‌های بالا، عوامل مختلف بر هر مکانیزم به‌طور متفاوتی تأثیر می‌گذارند. روابط دیگری که شامل هر دو پارامتر انتشار و رسانایی باشد نیز تحت شرایط خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند که بیشتر آنها از رابطهٔ Einstein منشعب می‌شوند [18].

در مواد متخلخل جامد (مانند بتن) جایی که فاز جامد به‌طور مؤثر به‌عنوان یک مسدودکننده عمل می‌کند، سرعت انتشار و رسانایی به پیچ‌وخم‌های مادهٔ متخلخل و ساختار منافذ مویین آن بستگی دارد [19]. ضریب ساختار (F) ثابت مواد می‌باشد که نسبت بین قابلیت جابه‌جایی (رسانایی) یک یون در مایع منفذی (σ_0) به قابلیت جابه‌جایی همان یون در مادهٔ متخلخل (σ) تعریف می‌شود. این ثابت همچنین طبق رابطهٔ (۲) برابر می‌باشد با قابلیت انتشار یک یون در مایع منفذی (D_0) به انتشار همان یون در مادهٔ متخلخل (D)[20].

$$F = \frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{D_0}{D} \qquad (۲)$$

ازنظر تئوری امکان تعیین ضریب انتشار یون‌های کلرید در یک مادهٔ متخلخل با اندازه‌گیری رسانایی امکان پذیر است. با اندازه‌گیری رسانایی یک مادهٔ متخلخل و رسانایی مایع منفذی آن، ضریب ساختار به‌دست می‌آید. سپس این عدد در ضریب انتشار یون‌های کلرید در مایع منفذی ضرب می‌شود تا ضریب انتشار کلرید در مادهٔ متخلخل به دست آید.

اگر چه ضریب انتشار بتن از اندازه‌گیری رسانایی بااستفاده از رابطهٔ الکتروشیمیایی Nernst-Planck به‌دست می‌آید، طبیعت غیر ایده‌آل محلول‌های مورد استفاده، بر این رابطه اثر می‌گذارد [21]. استفاده از ضریب ساختار تا زمانی که هر دو محلول دارای یون‌های یکنواخت در غلظت یکنواخت باشند (یعنی تعداد یون‌های گذرنده و ضریب فعالیت مشابهی داشته باشند)، این مشکل را از بین می‌برد. اشباع کردن نمونه‌های بتنی با یک محلول با رسانایی بالا باعث اطمینان از این می‌شود که رسانایی مایع منفذی تمامی نمونه‌ها در عمل یکی می‌باشد.

رسانایی محلول آب‌نمک اشباع به‌راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. از طرفی یون‌های قابل انتقال مانند Na^+، K^+ و OH^- در منافذ مویین بتن حضور دارند که می‌توانند رسانایی مایع منفذی (σ_0) را بالا ببرند. از لحاظ مکانیکی خارج کردن مایع منفذی بتن و اندازه‌گیری رسانایی آن بسیار مشکل و برای روش‌های سریع معمول غیر عملی می‌باشد. بنابراین باید مقدار σ_0 را فرض کرد.

رسانایی محلول NaCl با غلظت‌های متفاوت به‌صورت آزمایشگاهی توسط Streicher و Alexander [10] به‌دست آمده است. همچنین محلول‌های مشابه به‌علاوهٔ KOH نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا تأثیر یون‌های آنها بر روی رسانایی محلول NaCl بررسی شود. باتوجه به نتایج، میزان نرخ افزایش در رسانایی

محلول در غلظت‌های بالا، مخصوصا به‌دلیل افزایش ویسکوزیتهٔ محلول، کاهش می‌یابد.

در محلول حاوی NaCl و KOH، حضور NaCl مخصوصا در غلظت‌های بالاتر نقش اصلی را در رسانایی دارد. برای مثال، در محلول NaCl ۵ مول و KOH ۰/۱۶ مول، NaCl عهده‌دار ۹۲٪ رسانایی کل را دارد [10].

در تحقیق یادشده، مقدار ضریب ساختار، برای غلظت‌های مختلف محلول NaCl، NaCl به‌همراه ۰/۱۶ مول KOH و NaCl به‌همراه ۰/۳۲ مول KOH، محاسبه شده است. باتوجه به نتایج، قسمت رسانایی رابطه ضریب ساختار، در غلظت‌های بالای کلرید، مستقل از فرض مقدار KOH در مایع منفذی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در غلظت‌های پایین NaCl ضریب ساختار بسیار حساس نسبت به فرض میزان KOH موجود در مایع منفذی می‌باشد.

غلظت‌های یونی مایع منفذی دو نوع ملات حاوی سیمان پرتلند معمولی (OPC) و سیمان آمیخته با ۲۰٪ دودهٔ سیلیس توسط Page و Vennesland [22] اندازه‌گیری شده است. قابلیت جابه‌جایی معادل k^+، Na^+ و OH^- به‌ترتیب ۷۵، ۵۰ و ۲۰۰ $S.cm^2/mol$ می‌باشد. باتوجه به نتایج، رسانایی مایع منفذی ملات حاوی OPC تقریبا ۷ برابر بیشتر از ملات حاوی سیمان آمیخته با دودهٔ سیلیس می‌باشد، درصورتی که رسانایی مایع منفذی ملات حاوی OPC بعد از اشباع‌سازی با محلول NaCl ۵ مول، تقریبا فقط ۲۰ درصد بیشتر از ملات با سیمان آمیخته با دودهٔ سیلیس می‌باشد [22].

بنابراین می‌توان از مطالب گفته‌شده نتیجه گرفت که اگر نمونه‌های بتنی توسط محلول NaCl با غلظت بالا اشباع شوند رسانایی مایع منفذی آنها با رسانایی محلول NaCl مورد استفاده تفاوت کمی می‌کند. درنتیجه نمونه‌های بتنی مختلف دارای رسانایی مایع منفذی مشابهی می‌شوند. بنابراین نمونه‌های بتنی دارای رسانایی‌های الکتریکی متفاوتی متناسب با ریزساختار فیزیکی خود خواهند بود.

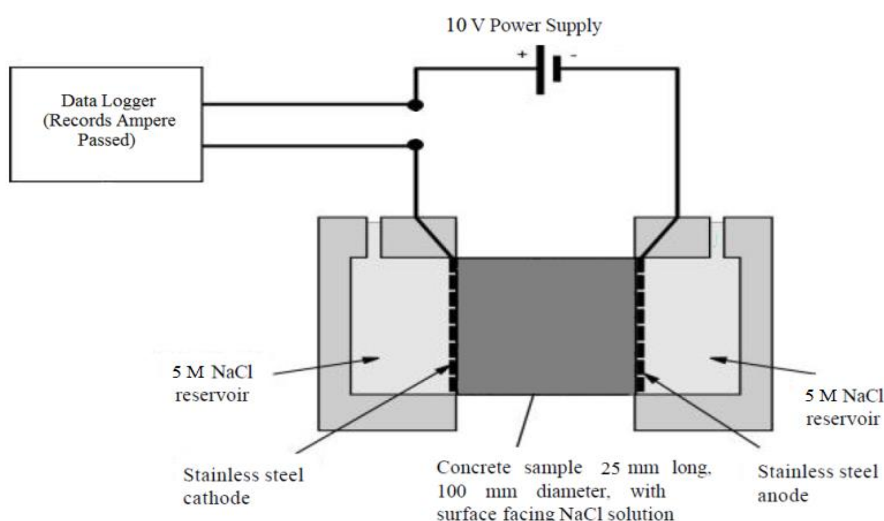
ارائهٔ روش آزمایش

این روش درحقیقت رویکردی اصلاح‌شده برای اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی حجمی نمونه‌های بتنی می‌باشد. در این روش نمونه‌ها قبل از آزمایش، توسط محلول NaCl ۵ مول اشباع می‌شوند. لازم به ذکر است که این ایده اولین‌بار توسط Streicher و Alexander [10]، ارائه شده است. درادامه توضیحات و نحوهٔ انجام آزمایش توضیح داده شده است.

تجهیزات

تجهیزات این روش شبیه تجهیزات روش آزمایش ASTM C1760 می‌باشد. این تجهیزات شامل دو سلول ۲۵۰ میلی‌لیتری متصل به یک بخش مرکزی می‌باشد که نمونهٔ بتنی در آن قرار می‌گیرد (شکل ۱). هر دو سلول به بخش مرکزی کاملا بسته می‌شوند و دو حلقهٔ پلاستیکی به دور نمونه قرار می‌گیرد و سلول‌ها کاملا آب‌بند می‌شوند. هر سلول با محلول NaCl ۵ مول پر می‌شود. اختلاف پتانسیل ۱۰ ولت جریان مستقیم توسط الکترودهای فلزی زنگ نزن به نمونه اعمال می‌شود. از یک آمپرمتر برای اندازه‌گیری دقیق میزان جریان عبوری استفاده می‌شود.

از آنجا که در این روش فقط یک جریان را قرائت می‌کنیم، از تجهیزات آزمایش می‌توان به‌طور متوالی برای مجموعه‌ای از نمونه‌ها استفاده کرد. مدت زمانی که برای بستن تجهیزات برای یک نمونه طول می‌کشد، میزان سرعت این روش را معین می‌کند. باتوجه به مدت نسبتا کوتاه آزمایش، تعداد یون‌های کمی جابه‌جا می‌شوند و می‌توان از سلول‌های کوچکی استفاده کرد.



شکل ۱ شکل شماتیک دستگاه روش ارائه‌شده

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

تجهیزات آزمایش برای نمونه‌های بتنی یا ملات به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر طراحی شده است (تجهیزات مشابهی می‌توان برای دیگر ابعاد طراحی کرد). معمولا نمونه‌ها را توسط دستگاه نمونه‌گیری، مغزه‌گیری می‌کنند و یا از قالب‌های استوانه‌ای استفاده می‌کنند و سپس آنها را با تیغهٔ الماسه برش می‌دهند. ضخامت دقیق نمونه‌ها توسط خط‌کش یا کولیس اندازه‌گیری می‌شود.

برای به‌دست آوردن ضخامت بهینه، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متری در ضخامت‌های مختلف (۵۰، ۳۰ و ۲۵ میلی‌متر) برش داده شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. ضخامت بهینه باتوجه به مدت زمان لازم برای اشباع‌سازی و همچنین میزان جریان عبوری از آن به‌دست آمد (ضخامت بهینه ۲۵ میلی‌متر درنظر گرفته شد).

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، آنها برای ۷ روز در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد در داخل آون قرار می‌گیرند تا رطوبتشان از بین برود. سپس نمونه‌ها را در داخل محفظهٔ خلأ به‌مدت ۳ ساعت قرار می‌دهند و سپس به‌مدت ۲ ساعت دیگر به‌صورت غوطه‌ور در محلول ۵ مول NaCl و خلأ باقی می‌مانند. بعد از آن، برای ۲ ± ۱۸ ساعت دیگر، به‌صورت غوطه‌ور در فشار هوا رها می‌شوند.

عمل خشک‌کردن برای اطمینان از اشباع شدن یکنواخت نمونه‌ها توسط محلول NaCl صورت می‌گیرد. همچنین دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد انتخاب می‌گردد تا صدمه کمتری نسبت به دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به نمونه‌ها وارد شود [23]. هرچند در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد نمونه‌ها مقداری کمتر نسبت به دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک می‌شوند، ولی رسانایی محلول در غلظت‌های بالا حساسیت کمی نسبت به تغییرات جزئی غلظت دارد. میزان زمان قرارگیری نمونه‌ها در خلأ بستگی به ضخامت آنها دارد و برای نمونه‌های با ضخامت ۲۵ میلی‌متر، ۵ ساعت کافی می‌باشد. برای تعیین زمان دقیق آن می‌توان نمونه‌ها را در طول این مدت وزن کرد و زمانی که وزن نمونه‌ها ثابت ماند، زمان مورد نیاز مشخص می‌شود.

قابل ذکر است که برای پیدا کردن نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها، از روش آزمون و خطا استفاده

گردید. ابتدا برای پیدا کردن زمان بهینهٔ خشک‌کردن نمونه‌ها، نمونه‌های مختلف بتنی در داخل آون در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد، قرار داده شدند و در روزهای متوالی وزن گردیدند و میزان تغییر وزن آنها ثبت گردید. پس از گذشت ۷ روز، تقریبا وزن تمامی نمونه‌ها ثابت باقی ماند. پس از این مرحله برای پیدا کردن زمان بهینه، نمونه‌ها به مدت‌های مختلف در خلأ قرار داده شدند و اشباع گردیدند. سپس نمونه‌ها از وسط به دو نیم تقسیم شدند و میزان نفوذ محلول کلرید بااستفاده از اسپری محلول ۰/۱ مول نیترات نقره مشاهده گردید.

نحوهٔ انجام و محاسبه

بعد از نصب و بستن سلول‌ها، ولتاژ اعمال می‌شود و پس از گذشت ۱ دقیقه، میزان جریان عبوری قرائت می‌شود. این جریان به‌عنوان خروجی آزمایش ثبت می‌شود. همان‌طور که گفته شد، اختلاف پتانسیل اعمالی ۱۰ ولت می‌باشد که برای پیدا کردن ولتاژ بهینه، اختلاف پتانسیل‌های مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ ولت) اعمال می‌شود و باتوجه به میزان جریان عبوری و تغییرات آن در طول زمان، اختلاف پتانسیل بهینه تعیین می‌گردد.

برای محاسبهٔ رسانایی هر نمونه بااستفاده از میزان ولتاژ اعمالی، جریان قرائت شده و ابعاد نمونه، از رابطهٔ (۳) استفاده می‌شود.

$$\sigma = \frac{i}{V} \cdot \frac{t}{A} \quad (۳)$$

که در آن σ رسانایی نمونه [mS/cm]، i جریان الکتریکی [mA]، V اختلاف پتانسیل [v]، t ضخامت نمونه [cm] و A سطح مقطع نمونه [cm^2] می باشد.

برنامهٔ آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی عملکرد روش ارائه‌شده برای سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلرید از ۲۰ طرح اختلاط مختلف شامل بتن معمولی و بتن حاوی پوزولان‌های دودهٔ سیلیس و پرلیت کلسینه‌شده استفاده گردید.

مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان تیپ ۱ استفاده گردید و دو پوزولان دودهٔ سیلیس و پرلیت کلسینه‌شده به‌عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده شد. در جدول (۱) ترکیبات شیمیایی و مشخصات فیزیکی این مواد آورده شده است.

پرلیت، سنگی معدنی با ساختار شیشه‌ای می‌باشد که حاصل فرایند سرد شدن سریع گدازه‌های آتشفشانی است. حدود ۲ تا ٦ درصد از ترکیب شیمیایی این ماده را آب تشکیل می‌دهد. آب موجود در ساختار شیمیایی پرلیت بر اثر اعمال حرارت بخار می‌شود و با افزایش دما به میزان ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد، گاز حاصل حباب‌هایی را در داخل سنگ نرم‌شده تشکیل می‌دهد که موجب تشکیل یک ساختار کف‌مانند می‌گردد. تشکیل این حباب‌ها سبب انبساط پرلیت حدود ۱۵ تا ۲۰ برابر حجم اولیهٔ آن می‌شود. در این تحقیق از پودر پرلیت کلسینه‌شده (حرارت‌دهی در دمای ۸۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت یک ساعت) استفاده گردید.

برای تمامی طرح‌ها از شن شکسته‌شده به‌عنوان درشت‌دانه با حداکثر اندازهٔ ۱۹ میلی‌متر و ماسهٔ طبیعی به‌عنوان ریزدانه استفاده گردید. برای رسیدن به کارایی مطلوب از فوق روان‌کننده در حد نیاز استفاده شد. فوق روان‌کنندهٔ مورد استفاده از نوع پایه پلی کربوکسیلات بوده است. وزن مخصوص این فوق روان‌کننده ۱/۲ gr/cm^3 است و محدودهٔ مصرف آن ۰/۸ تا ۱/۲ درصد وزنی سیمان مصرفی می‌باشد. برای ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی از آب شرب استفاده گردید.

جدول ۱ ساختار شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و مواد پوزولانی مورد استفاده

ترکیبات شیمیایی (%)		سیمان	دودهٔ سیلیس	پرلیت کلسینه شده
SiO_2		۲۱/۳۲	۹۳/٦	۷۲/٦۲
Al_2O_3		٤/۳	۱/۳	۱٤/۳۲
Fe_2O_3		۲/۲	۰/۹	۱/٥٤
CaO		٦٥/۳	۰/٥	۲/۲٤
SO_3		۲/۰۹	۰/۱	---
MgO		۲/۱۷	۱/۰	۰/۸۲
Na_2O		۰/۳٦	۰/۳٦	۲/۸٥
K_2O		۰/٦۳	۰/۹	٤/۹
LOI		۰/۹۱	---	۲/٦۷
مشخصات فیزیکی	وزن مخصوص	۳/۱	۲/۱٤	۲/۸۷
	نرمی (cm^2/g)	۲۹۰۸	---	۳۱۰۰

جدول ۲ طرح‌های اختلاط

ردیف	عنوان طرح	مقدار مواد سیمانی (kg/m^3)	w/b	مواد پوزولانی		مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
				نوع	درصد جایگزینی	
۱	SF404500	٤۰۰	۰/٤٥	SF	۰	٤٦/۰
۲	SF403500	٤۰۰	۰/۳٥	SF	۰	٦۲/۳
۳	SF354500	۳٥۰	۰/٤٥	SF	۰	٥۰/٥
٤	SF353500	۳٥۰	۰/۳٥	SF	۰	٦٥/۸
٥	SF404507	٤۰۰	۰/٤٥	SF	۷/٥	٥۸/۰
٦	SF403507	٤۰۰	۰/۳٥	SF	۷/٥	۷۸/۰
۷	SF354507	۳٥۰	۰/٤٥	SF	۷/٥	٦۰/۳
۸	SF353507	۳٥۰	۰/۳٥	SF	۷/٥	۷۸/۰
۹	SF404515	٤۰۰	۰/٤٥	SF	۱٥	٦۰/۳
۱۰	SF403515	٤۰۰	۰/۳٥	SF	۱٥	۷۸/٥
۱۱	SF354515	۳٥۰	۰/٤٥	SF	۱٥	٦٤/۳
۱۲	SF353515	۳٥۰	۰/۳٥	SF	۱٥	۸۰/۰
۱۳	Pe304500	۳۰۰	۰/٤٥	CPP	۰	٤۳/۳
۱٤	Pe304510	۳۰۰	۰/٤٥	CPP	۱۰	٤۰/۰
۱٥	Pe304520	۳۰۰	۰/٤٥	CPP	۲۰	۳۹/۰
۱٦	Pe304530	۳۰۰	۰/٤٥	CPP	۳۰	٤۰/۰
۱۷	Pe303500	۳۰۰	۰/۳٥	CPP	۰	٥۹/۰
۱۸	Pe303510	۳۰۰	۰/۳٥	CPP	۱۰	٥۳/۸
۱۹	Pe303520	۳۰۰	۰/۳٥	CPP	۲۰	٥۳/۰
۲۰	Pe303530	۳۰۰	۰/۳٥	CPP	۳۰	٥۱/۳

طرح‌های اختلاط و ساخت

متغیرهای طرح‌های اختلاط ساخته‌شده شامل عیار سیمان (۳۰۰، ۳۵۰ و ٤٠٠ کیلوگرم بر متر مکعب)، آب به مواد سیمانی (۰/۳۵ و ۰/٤٥)، درصد جایگزینی دودهٔ سیلیس به‌عنوان جایگزین سیمان (صفر و ۷/۵ درصد وزنی سیمان) و همچنین درصد پرلیت جایگزینی سیمان (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی سیمان) می‌باشد. خلاصه طرح‌های اختلاط در جدول (۲)، آورده شده است.

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا سنگدانه‌ها و آب لازم برای رسیدن به حالت SSD درون مخلوط‌کن ریخته شد و عمل اختلاط صورت پذیرفت. در ادامه، دودهٔ سیلیس و یا پرلیت که با مقداری از آب اختلاط به‌صورت لجن درآمده بودند به سیستم اضافه شد و عمل اختلاط ادامه یافت. درانتها، سیمان اضافه شد و درحین اختلاط مابقی آب به‌صورت تدریجی به مخلوط اضافه شد.

تراکم بتن در قالب‌ها بااستفاده از میز ویبره انجام شد. پس از عملیات ماله‌کشی، قالب‌ها با گونی مرطوب و یک لایه پلاستیک پوشیده و به‌مدت ۲۰ تا ۲٤ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری گردیدند. پس از طی این مدت نمونه‌ها از قالب خارج شدند و به محفظه‌های حاوی آب آهک اشباع منتقل شدند و تا زمان آزمایش در دمای ۳±۲۳ درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری گردیدند.

نتایج و بحث

به‌منظور تفسیر نتایج و مقایسهٔ آنها با روش‌های استاندارد موجود، هم‌زمان با روش ارائه‌شده، که پس از این آن را Modified Bulk Conductivity (MBCT Test) می‌نامیم، دو آزمایش RCPT [24] و Bulk Conductivity [25] نیز بر روی تمامی طرح‌های اختلاط انجام گردید. همچنین آزمایش Bulk Diffusion [26] نیز بر روی نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس پس از ۹۱ روز عمل‌آوری انجام شد.

برای انجام آزمایش‌های RCPT و BC، برای هر طرح اختلاط و در هر سن آزمایش، سه نمونه به‌ضخامت ۵۰ میلی‌متر از میان نمونهٔ استوانه‌ای ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متری برش داده شد. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها طبق استاندارد، نمونه‌ها در داخل سلول‌های آزمایش قرار داده شدند و اختلاف پتانسیل ٦٠ ولت به دو سر نمونه‌ها اعمال گردید و جریان عبوری از آنها ثبت گردید. از میانگین نتایج سه آزمونه برای کاهش پراکندگی نتایج استفاده گردید. همچنین از نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری برای آزمایش BD استفاده گردید. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، مطابق استاندارد به‌مدت ۵ ماه در محلول NaCl با غلظت ١٦٥ گرم در لیتر قرار داده شدند. درنهایت ضریب انتشار یون‌های کلرید با برازش رابطهٔ فیک برروی پروفیل نفوذ یون‌های کلرید محاسبه گردید. نتایج آزمایش‌ها در جدول ۳، آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه‌ها، برای مقادیر مساوی مواد سیمانی، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و درنتیجه کاهش منافذ مویین، رسانایی و نفوذپذیری بتن کاهش پیدا می‌کند.

به‌علاوه، در نسبت ثابت آب به مواد سیمانی، با کاهش عیار مواد سیمانی، رسانایی و مجموع بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با کاهش عیار مواد سیمانی، فاز خمیر سیمان نسبت به فاز مصالح سنگی در حجم بتن کاهش می‌یابد. از طرفی مصالح سنگی به‌عنوان مواد نارسانا در ساختار بتن عمل می‌کند. بنابراین با افزایش نسبت فاز نارسانای بتن به فاز خمیر سیمان، رسانایی بتن کاهش می‌یابد.

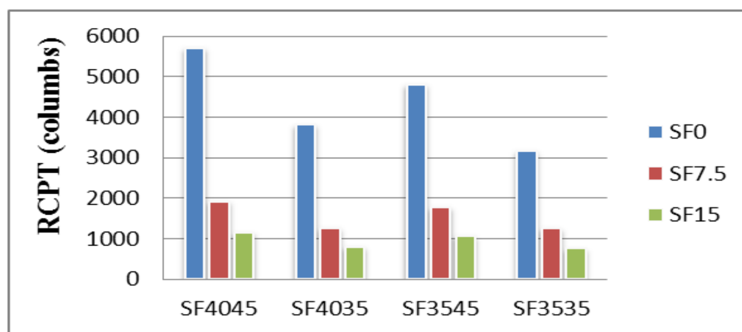
همان‌طور که در شکل‌های (۲) تا (۵) مشاهده می‌گردد، در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ثابت و عیار مواد سیمانی مساوی، در اثر جایگزینی سیمان با دودهٔ سیلیس، رسانایی الکتریکی نمونه‌ها و مجموع بار الکتریکی عبوری در آزمایش RCPT به‌میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که واکنش‌های پوزولانی باعث افزایش پیچ‌وخم‌های منافذ مویین در خمیر سیمان می‌شود و

باعث افزایش تراکم آن می‌شود. علاوه بر آن واکنش‌های پوزولانی باعث مصرف یون‌های OH^- موجود در مایع منفذی بتن می‌شوند که مهم‌ترین نقش را در رسانایی مایع منفذی بتن دارند [27]. درنتیجه، با مصرف آنها رسانایی بتن به‌شدت کاهش می‌یابد.

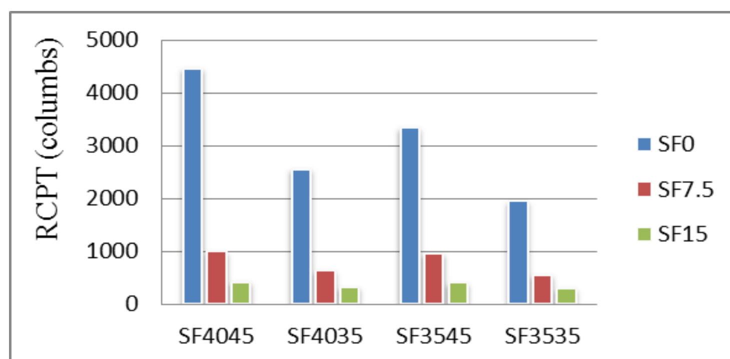
اما باتوجه به شکل‌های (٦) و (۷) این کاهش رسانایی در روش MBCT تعدیل یافته است. دلیل این امر اشباع‌سازی نمونه‌های آزمایش توسط محلول NaCl ۵ مول می‌باشد که باعث شده است رسانایی مایع منفذی نمونه‌های مختلف شبیه به هم باشند. بنابراین تغییرات در رسانایی نمونه‌ها به‌خاطر تغییرات در ریزساختار منافذ مویین آنها می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت که نتایج این روش حساسیت کمی نسبت به تغییرات رسانایی مایع منفذی نمونه‌های مختلف آزمایش دارد و نتایج آن متناسب با ریزساختار منافذ و نفوذپذیری نمونه‌ها می‌باشد.

جدول ۳ نتایج آزمایش‌ها

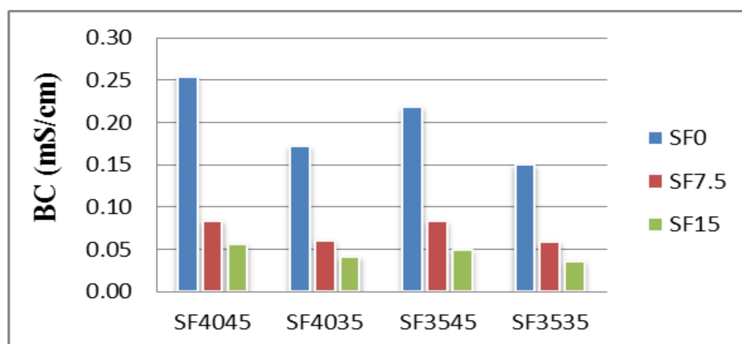
ردیف	عنوان طرح	BC (mS/cm)		RCPT (columbs)		MBCT (mS/cm)		BD ($m^2/s\times10^{-12}$)
		۲۸ روزه	۹۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه	۲۸ روزه	۹۱ روزه	شروع از ۹۱ روزه
۱	SF404500	۰/۲۵٤	۰/۱۸۳	۵۷۰٦	٤٤٦۰	۱/۰۹	۰/۸۸	٤/۰۰
۲	SF403500	۰/۱۷۲	۰/۱۱۹	۳۸۰۷	۲۵۵٦	۰/۷۲	۰/۵۹	۳/۱۳
۳	SF354500	۰/۲۱۸	۰/۱٤۹	٤۸۰۲	۳۳۳۵	۰/۹۸	۰/۸۲	۳/۲۳
٤	SF353500	۰/۱۵۰	۰/۰۸۸	۳۱۵۸	۱۹٤٤	۰/٦۲	۰/٤۳	۲/۱۹
۵	SF404507	۰/۰۸٤	۰/۰٤۷	۱۹۱۸	۹۸۸	۰/٦۱	۰/٤۷	۱/۹۲
٦	SF403507	۰/۰٦۰	۰/۰۳۰	۱۲٦۲	٦۲۹	۰/٤۰	۰/۳۰	۱/۲۱
۷	SF354507	۰/۰۸۳	۰/۰٤۳	۱۷۷۲	۹۵۸	۰/۵۷	۰/٤٤	۱/٤۲
۸	SF353507	۰/۰۵۹	۰/۰۲۷	۱۲٤۳	۵۵۱	۰/۳٦	۰/۲۳	۰/۷۹
۹	SF404515	۰/۰۵٦	۰/۰۱۹	۱۱٤۳	٤۱۷	۰/۵۰	۰/٤۰	۱/٤۷
۱۰	SF403515	۰/۰٤۱	۰/۰۱۵	۷۹٦	۳۱۹	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۸٤
۱۱	SF354515	۰/۰٤۹	۰/۰۱۸	۱۰٦۲	۳۹٦	۰/٤٦	۰/۳۵	۱/۳۰
۱۲	SF353515	۰/۰۳٦	۰/۰۱٤	۷۵۰	۲۹٤	۰/۳۰	۰/۱۹	۰/۷۰
۱۳	Pe304500	۰/۳۰۳	۰/۲۰۲	٦۷٦۹	۵٤۷۲	۱/۵۷	۱/٤۰	———
۱٤	Pe304510	۰/۲٤۹	۰/۱۲۱	۵۷۹٦	۱٦۱۸	۱/۵۰	۱/۲۰	———
۱۵	Pe304520	۰/۲۰۷	۰/۰۷۲	٤۳۷٤	۱٤۸۵	۱/۳۱	۱/۰۳	———
۱٦	Pe304530	۰/۱٤۸	۰/۰۵۰	۳۱۲۹	۱۰٤۲	۱/۲۵	۰/۸۱	———
۱۷	Pe303500	۰/۱۷۹	۰/۱۳۱	۳۹۲۲	۳۱۵۹	۱/۲٤	۱/۰۹	———
۱۸	Pe303510	۰/۱٦۲	۰/۰۸۲	3550	۲۰۱۰	۱/۲۰	۰/۹۵	———
۱۹	Pe303520	۰/۱٤۱	۰/۰۵۲	۳۰۷۸	۱۱۲۰	۱/۰٤	۰/۸۳	———
۲۰	Pe303530	۰/۱۲۵	۰/۰٤٤	۲٦۹۲	۸۱۰	۰/۹۹	۰/٦۵	———



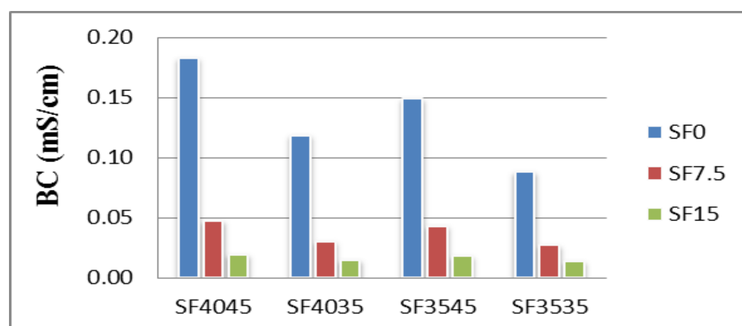
شکل ۲ نتایج آزمایش RCPT طرح‌های حاوی دودهٔ سیلیس، ۲۸ روزه



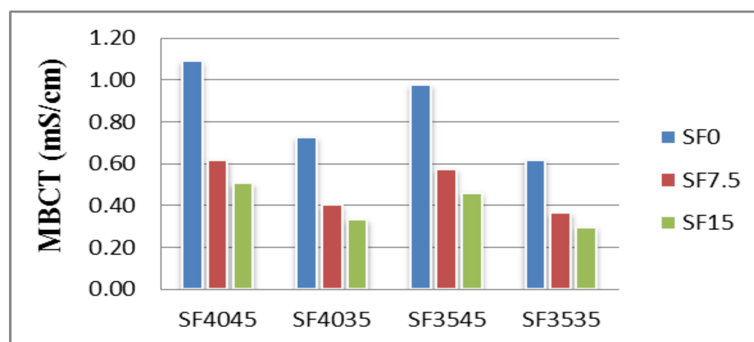
شکل ۳ نتایج آزمایش RCPT طرح‌های حاوی دودهٔ سیلیس، ۹۱ روزه



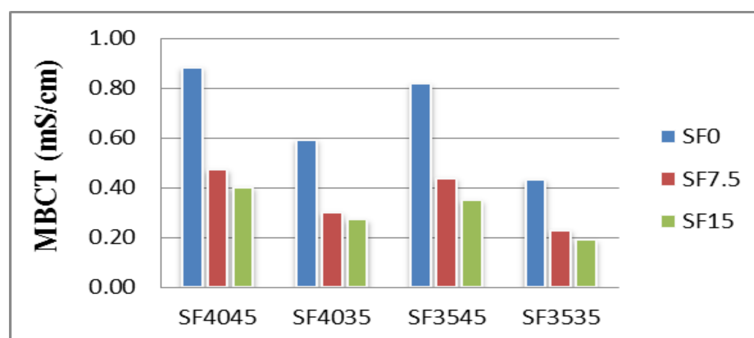
شکل ٤ نتایج آزمایش BC طرح‌های حاوی دودهٔ سیلیس، ۲۸ روزه



شکل ٥ نتایج آزمایش BC طرح‌های حاوی دودهٔ سیلیس، ۹۱ روزه



شکل ٦ نتایج آزمایش MBCT طرح‌های حاوی دودهٔ سیلیس، ۲۸ روزه



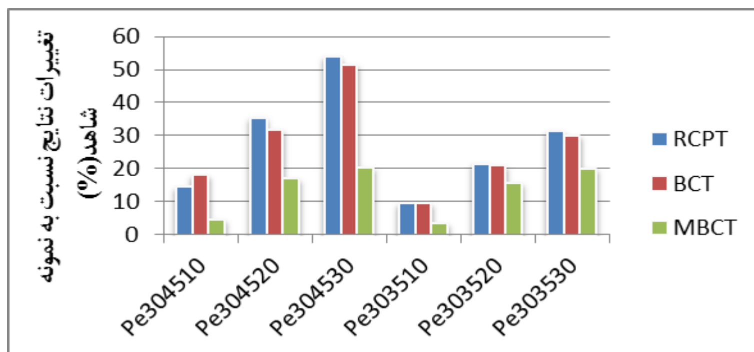
شکل ۷ نتایج آزمایش MBCT طرح‌های حاوی دودهٔ سیلیس، ۹۱ روزه

شکل‌های (۸) و (۹)، بیانگر نسبت تغییرات نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برروی نمونه‌های حاوی پرلیت کلسینه‌شده نسبت به نمونه‌های شاهد در درصدهای مختلف جایگزینی سیمان می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات نتایج آزمایش MBCT نسبت به دو روش دیگر کمتر می‌باشد.

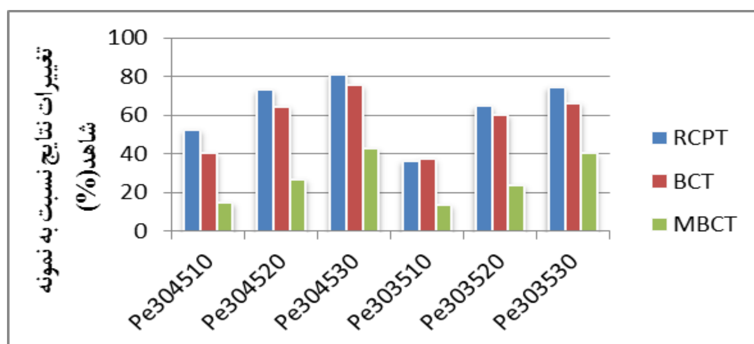
جایگزینی سیمان با پرلیت کلسینه‌شده در سطح‌های مختلف باعث کاهش نتایج آزمایش‌های RCPT و BC تا نصف در سن ۲۸ روز شده است. دلایل اصلی این امر کاهش مقدار سیمان طرح و واکنش‌های پوزولانی می‌تواند باشد [28]. درحقیقت، جایگزینی سیمان باعث کاهش یون‌های موجود در مایع منفذی می‌شود و واکنش‌های پوزولانی می‌تواند این مسئله را تشدید کند. علاوه بر آن، در سن ۹۱ روز، این کاهش در نتایج شدیدتر می‌شود و به کمتر از یک‌پنجم درمقایسه با نمونه‌های شاهد می‌رسد. می‌توان گفت دلیل اصلی این مسئله پیشرفت واکنش‌های پوزولانی پرلیت کلسینه‌شده می‌باشد که باعث کاهش رسانایی مایع منفذی شده است.

براساس روابط بین نتایج این سه روش و پایه‌های فیزیکی آنها، می‌توان از جدول پیشنهادی (٤) برای رده‌بندی بتن‌های مختلف ازجهت نفوذپذیری آنها درمقابل یون‌های کلرید استفاده کرد.

در شکل (۱۰) ارتباط بین نتایج آزمایش MBCT نمونه‌های حاوی دودهٔ سیلیس در سن ۹۱ روز با نتایج آزمایش BD آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین نتایج رابطه‌ای توانی با دقت بالا (R2=0.94) وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که نتایج آزمایش MBCT به‌خوبی بیانگر مشخصات انتشارپذیری بتن می‌باشد و می‌توان از آنها برای پیش‌بینی انتشارپذیری نمونه‌های بتنی استفاده کرد.



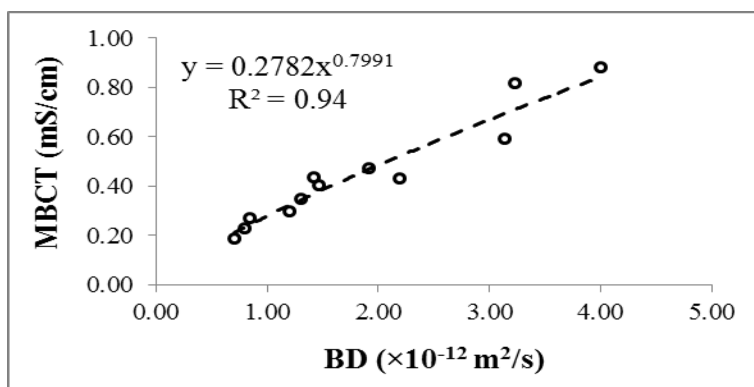
شکل ۸ تغییرات نتایج آزمایش‌های طرح‌های حاوی CPP نسبت به نمونهٔ شاهد، ۲۸ روزه



شکل ۹ تغییرات نتایج آزمایش‌های طرح‌های حاوی CPP نسبت به نمونهٔ شاهد، ۹۱ روزه

جدول ٤ رده‌بندی بتن ازجهت نفوذپذیری درمقابل یون‌های کلرید

Chloride permeability	RCPT (coulombs) [24]	BC (mS/cm)	MBCT (mS/cm)
high	> ٤٠٠٠	> ٠/١٦	> ١/١
medium	٢٠٠٠ - ٤٠٠٠	٠/٠٨ – ٠/١٦	٠/٧١ – ١/١
low	١٠٠٠ - ٢٠٠٠	٠/٠٤ – ٠/٠٨	٠/٤٥ – ٠/٧١
very low	١٠٠ - ١٠٠٠	٠/٠٠٤ – ٠/٠٤	٠/١٣ – ٠/٤٥
negligible	< ١٠٠	< ٠/٠٠٤	< ٠/١٣



شکل ۱۰ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های MBCT و BD

نتیجه‌گیری

روش MBCT که در این مقاله ارائه شد، دارای پایه‌های تئوری واضح و دقیقی می‌باشد. می‌توان گفت این روش، یکی از سریع‌ترین روش‌های سنجش مقاومت بتن دربرابر نفوذ یون‌های کلرید می‌باشد که تا به حال ارائه شده است. علاوه بر آن نتایج زیر را می‌توان از این تحقیق بیان کرد:

۱. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از دودهٔ سیلیس و پرلیت کلسینه‌شده باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. واکنش‌های پوزولانی ساختار منافذ را متراکم‌تر می‌کند و ارتباطات آنها را قطع می‌کند.

۲. در تمامی نمونه‌ها، برای مقادیر مساوی مواد سیمانی، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و درنتیجه کاهش منافذ مویین، رسانایی و نفوذپذیری بتن کاهش پیدا می‌کند. به‌علاوه، در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، کاهش عیار مواد سیمانی باعث کاهش رسانایی و مجموع بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها می‌شود.

۳. با مصرف یون‌های OH^- در واکنش‌های پوزولانی، رسانایی مایع منفذی کاهش پیدا می‌کند. درنتیجه، شاخص نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی دودهٔ سیلیس و پرلیت کلسینه‌شده در آزمایش‌های RCPT و BC کاهش شدیدی نسبت به نمونه‌های شاهد نشان می‌دهد. این مسئله باعث ضعف این روش‌ها در سنجش نفوذپذیری کلریدی نمونه‌های بتنی حاوی پوزولان می‌باشد.

٤. مشاهده گردید که رابطه‌ای قوی بین نتایج آزمایش‌های MBCT و BD وجود دارد.

۵. نتایج نشان می‌دهد که روش MBCT نسبت به روش‌های RCPT و BC حساسیت کمتری نسبت به جایگزینی سیمان با پوزولان‌ها و درنتیجه تغییرات رسانایی مایع منفذی دارد. این امر به‌دلیل اشباع‌سازی نمونه‌ها توسط محلول غلیظ NaCl می‌باشد که باعث می‌شود نمونه‌های مختلف بتنی دارای رسانایی‌های مایع منفذی مشابهی باشند. بنابراین می‌توان از MBCT به‌عنوان روشی مناسب و قابل اطمینان درجهت ارزیابی عملکرد و دوام بتن‌های مختلف، استفاده کرد.

مراجع

1. C. Andrade, R. d’Andrea, and N. Rebolledo, "Chloride Ion Penetration in Concrete: The Reaction Factor in the Electrical Resistivity Model", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 47, PP. 41-46, (2014).
2. A. Atkinson and A. K. Nickerson, "The Diffusion of Ions through Water-saturated Cement", *Journal of Materials Science*, Vol. 19, PP. 3068-3078, (1984).
3. K. Audenaert, Q. Yuan, and G. De Schutter, "On the Time Dependency of the Chloride Migration Coefficient in Concrete", *Construction and building materials*, Vol. 24, PP. 396-402, (2010).
4. R. D. Hooton and E. Karkar, "Specifying Fluid Penetration Resistance of Concrete", presented at the international congress on durability of concrete, (2012).
5. H. Sorensen and J. M. Fredriksen, "Testing and Modelling of Chloride Penetration into Concrete", Nordic Concrete Research, Research Projects 1990, Oslo, PP. 354-356, (1990).
6. Z. T. and O. E. Gjorv, "A Fundamental Study of Chloride Diffusion into Cementitious Materials" *Journal of Physical Chemistry*, (1995).

7. A. Pilvar, A. A. Ramezanianpour, and H. Rajaie, "New Method Development for Evaluation Concrete Chloride Ion Permeability", Construction and Building Materials, (2015).
8. D. Whiting, "Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete", Final Report Portland Cement Association, Skokie, IL. Construction Technology Labs., Vol. 1, (1981).
9. A. A. Ramezanianpour, A. Pilvar, M. Mahdikhani, and F. Moodi, "Practical Evaluation of Relationship between Concrete Resistivity, Water Penetration, Rapid Chloride Penetration and Compressive Strength", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, PP. 2472-2479, (2011).
10. P. E. Streicher and M. G. Alexander, "A Chloride Conduction Test for Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, PP. 1284-1294, (1995).
11. Nordtest, "NT Build 355: Concrete, Mortar and Cement Based Repair Mmaterials: Chloride Diffusion Coefficient from Migration Cell Experiments. Nordtest Standards Institution", ed, (1995).
12. T. Luping and L.O. Nilsson, "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electric Field", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, (1993).
13. Y. Shimizu, "An Electrical Method for Measuring the Setting Time of Portland Cement", *Mill Section of Concrete*, Vol. 32, PP. 111-113, (1928).
14. J. Calleja, "Effect of Current Frequency on Measurement of Electrical Resistance of Cement Pastes", in *ACI Journal Proceedings*, (1952).
15. H. Whittington, J. McCarter, and M. Forde, "The Conduction of Electricity through Concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 33, PP. 48-60, (1981).
16. "Resistivity Measurements in Cementitious Systems: Observations of Factors that Influence the Measurements", *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2342, PP. 90 - 98, (2013).
17. A. A. Ramezanianpour, A. R. Pilvar, M. Mahdikhani, F. Moodi, and R. Pilvar, "Developing a Modified Rapid Chloride Permeability Test for Mortar Concrete", in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, ed: CRC Press, PP. 279-286, (2012).
18. J. O. M. Bockris and A. K. N. Reddy, Modern Electrochemistry, 2nd Edition ed.: Macdonald Ltd. London, (2000).
19. R. K. Dhir, M. R. Jones, H. E. H. Ahmed, and A. M. G. Seneviratne, "Rapid Estimation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 42, PP. 177-185, (1990).
20. K. Snyder, "The Relationship between the Formation Factor and the Diffusion Coefficient of Porous Materials Saturated with Concentrated Electrolytes: Theoretical and Experimental Considerations", *Concrete Science and Engineering*, Vol. 3, PP. 216-224, (2001).
21. L. Tang, "Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete—Current Development ", *Magazine of concrete research*, Vol. 48, PP. 173-179, (1996).
22. C. L. Page and Ø. Vennesland, "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cement Pastes", *Materials and Structures*, Vol. 16, PP. 19-25, (1983).

23. M. Pigeon, F. Garnier, R. Pleau, and P.-C. Aitcin, "Influence of Drying on the Chloride Ion Permeability of HPC", Concrete International, Vol. 15, (1993).
24. ASTM, "C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ed. ASTM International: West Conshohocken Pennsylvania, (2012).
25. ASTM, "C 1760: Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete", ed, (2012).
26. ASTM, "C 1556: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion", ed, (2011).
27. C. Shi, J. A. Stegemann, and R. J. Caldwell, "Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T277 and ASTM C1202) Results", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, (1998).
28. A. Ramezanianpour, S. M. Motahari Karein, P. Vosoughi, A. Pilvar, S. Isapour, and F. Moodi, "Effects of Calcined Perlite Powder as a SCM on the Strength and Permeability of Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 66, PP. 222-228, (2014).